

## МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 528.88:626.33

DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.32

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ БЕСХОЗЯЙНЫХ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

К.А. Курганович, А.В. Шаликовский,  
М.А. Босов, Д.В. Кочев

*Восточный филиал Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Чита, Россия*  
naptheodor@mail.ru

### THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR MONITORING THE CONDITION OF OWNERLESS FLOOD CONTROL HYDRAULIC STRUCTURES OF THE TRANS- BAIKAL TERRITORY

Konstantin A. Kurganovich,  
Andrey V. Shalikovskiy, Maxim A. Bosov,  
Denis V. Kochev

*Eastern Branch of Russian Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources (FGBU RosNIIVH), Chita, Russia*  
naptheodor@mail.ru

**Аннотация.** В Забайкальском крае существует большое количество бесхозных противопаводковых защитных гидротехнических сооружений, построенных без надлежащего проектирования и контроля правильности соблюдения технологии производства работ. Часть дамб не имеет собственников и не учтены в регистре гидротехнических сооружений, их состояние и режим использования не контролируются. В процессе эксплуатации защитные дамбы подвергаются механическим и гидродинамическим воздействиям, что несет в себе угрозу повышенного риска возникновения дополнительного ущерба вследствие переоцененного уровня защищенности территорий. Необходим учет таких сооружений с целью вынесения рекомендаций по дальнейшему их использованию или проведению ремонта.

В данной статье описывается опыт использования беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) для обследования бесхозных

**Abstract.** There are a large number of ownerless flood control protective hydraulic structures built without proper design and correct observance of the production technology in the Trans-Baikal Territory. Some dams do not have owners and are not registered in the «Register of hydraulic structures», their condition and mode of use are not controlled. During operation, protective dams are subjected to mechanical and hydrodynamic influences, which carries an increased risk of additional damage due to the overestimated level of protection of the territories. It is necessary to take into account such structures in order to make recommendations for their further use or repair.

This article describes the experience of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for examining ownerless flood control protective hydraulic structures of the Trans-Baikal Territory. The scheme of conducting such surveys, which includes several stages, is considered. At the initial stage, the installation of ground reference points markers and their coordination is required. Then, the UAV is circled

противопаводковых защитных гидротехнических сооружений Забайкальского края. Рассмотрена схема проведения таких обследований, включающая в себя несколько этапов. На начальном этапе требуется установка наземных опорных точек-маркеров и их координирование, затем облет территории БПЛА и получение серии фотоснимков. Следующий этап включает фотограмметрическую обработку данных съемки и получение пространственно-привязанных модели рельефа местности и ортофотоплана, которые затем подвергаются анализу с целью выявления дефектов сооружений.

Использование БПЛА при обследовании защитных противопаводковых сооружений продемонстрировало возможность более качественного оценивания их состояния по сравнению с традиционными методами инструментальных наблюдений. Для получения наилучшего результата в моделировании рекомендуется производить съемку с высоты не более 200 м и использовать координированные опорные точки, которые видно с воздуха для привязки модели к системе координат. В этом случае ошибка в определении отметок поверхности земли не будет превышать пространственного разрешения снимка. Местоположение опорных точек не оказывает существенного влияния на точность определения модели рельефа.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты (БПЛА); цифровая модель рельефа местности; бесхозные противопаводковые защитные гидротехнические сооружения; аэрофотосъемка; ортофотоплан; фотограмметрическая обработка снимков.

## Введение

Инженерные мероприятия по защите территорий от затопления в результате наводнений на реках обычно включают в себя строительство защитных дамб, которые необходимы для создания контура с повышенными отметками и отсечения территории от воды во время паводка. Однако вследствие кажущейся простоты возведения

over the territory and a series of photographs is taken. The next step involves photogrammetric processing of the survey data and obtaining spatially-linked terrain and orthomosaic models, which are then analyzed to identify structural defects.

The use of UAVs during the inspection of flood control structures demonstrated the possibility of a better assessment of their condition compared to traditional instrumental observation methods. To obtain the best result in the simulation, it is recommended to shoot from a height of not more than 200 m and use coordinated reference points that are visible from the air to bind the model to the coordinate system. In this case, the error in determining the elevation of the earth's surface will not exceed the spatial resolution of the image. The location of the control points does not significantly affect the accuracy of determining the terrain model.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles (UAVs); structure from motion; terrain model; orthomosaic; ownerless flood control protective hydraulic structures; aerial photography; photogrammetric image processing.

таких сооружений, их строительство зачастую осуществляется хозяйственным способом, без надлежащего проектирования и контроля правильности соблюдения технологии производства работ. Часть дамб, построенных в авральном режиме во время прохождения паводков, вообще не имеет собственников и не учтены в регистре гидротехнических сооружений, их состояние и режим

использования не контролируются. При этом в процессе эксплуатации защитные дамбы подвергаются механическим и гидродинамическим воздействиям, что приводит к их частичному разрушению, возникновению просадок гребня, промоин в теле, нарушению крепления откосов.

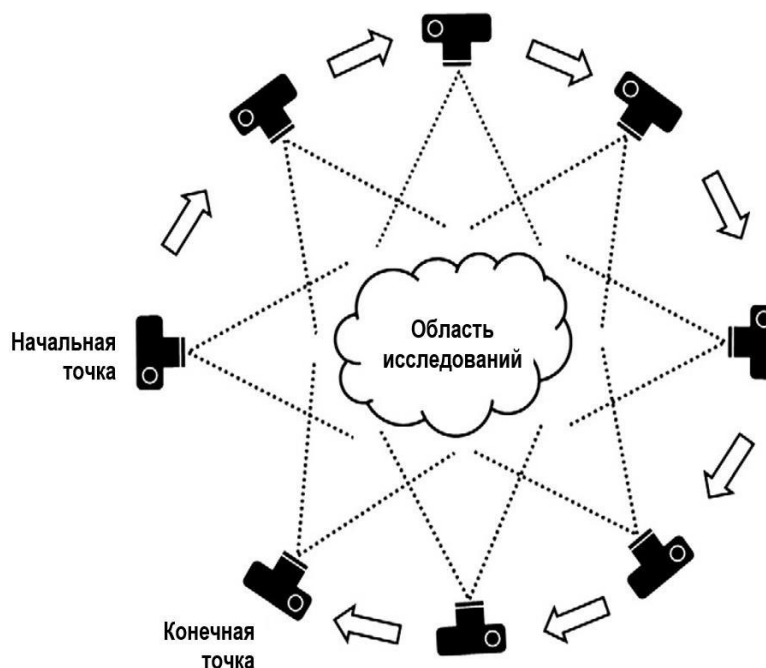
Такая ситуация несет в себе угрозу повышенного риска возникновения дополнительного ущерба вследствие переоцененного уровня защищенности территорий [Шаликовский, Курганович, 2011; Shalikovskiy, Kurganovich 2017]. Необходимы инструментальные и визуальные наблюдения за неучтенными бесхозными противопаводковыми сооружениями с целью выдачи рекомендаций по дальнейшему их использованию или проведению ремонта. Стандартными практиками в таких случаях являются как наземные, так и дистанционные виды съемок. Среди исследований первого типа самыми широко распространенными являются GNSS-изыскания, тахеометрическая съемка и наземные лазерные сканеры. Эти способы исследования сравнительно недорогие и имеют хорошую точность, но являются трудоемкими в случаях картирования больших по площади территорий и не всегда позволяют передать все особенности рельефа, его специфических элементов. Если же требуется повышение пространственного разрешения данных наземной топографической съемки, то при этом трудоемкость их получения и обработки увеличивается пропорционально квадрату расстояния. Для мониторинга больших по протяженности сооружений и больших площадей за короткие интервалы времени используются также данные дистанционного зондирования, аэрофотосъемка, спутниковые снимки и данные лидарного зондирования [Курганович и др., 2017]. Их основные ограничения заключаются в сравнительно высокой стоимости и сложности получения изображений за строго выбранный момент времени.

В последнее время в мониторинге сооружений все большее применение находят

новые способы исследования, основанные на использовании беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) [Ridolfi et al., 2017; Khaloo et al., 2018;]. Оценка состояния противопаводковых защитных гидротехнических сооружений с использованием БПЛА является инновационным подходом, предоставляющим возможности перехода от традиционного к усовершенствованному обследованию объекта, а выработка методики и оценка ее применимости является необходимой и актуальной задачей.

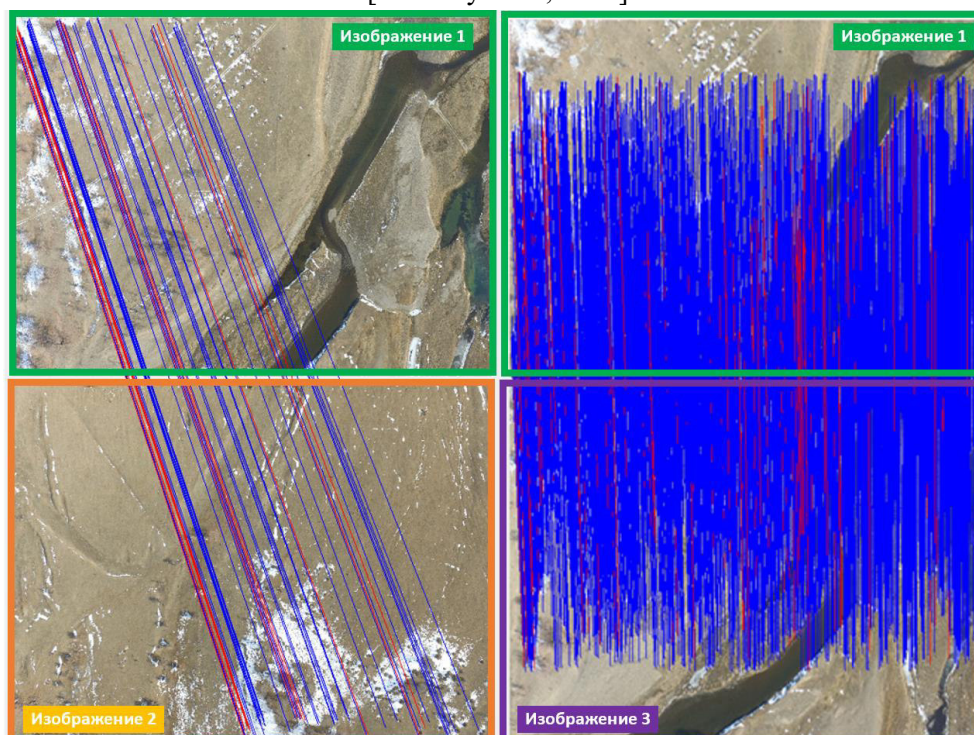
### Материалы и методы

При использовании стандартной конфигурации оборудования, БПЛА состоит из цифровой фотокамеры, закрепленной на пропеллерном или крылатом летательном аппарате, который управляется дистанционно с земли. Аппарат производит съемку местности, полученная серия снимков анализируется с использованием алгоритмов реконструкции трехмерной сцены из фотографий, таких как *structure from motion* (далее – SfM). В результате реконструкции получается цифровая модель рельефа высокого разрешения и ортофотоплан местности. Метод *SfM* является в настоящее время наиболее развитым алгоритмом получения трехмерных моделей местности и наиболее широко используемым в практике проведения съемок с БПЛА [James, Robson, 2012; Westoby et al., 2012]. Он использует алгоритмы обработки серии изображений, сделанных с перекрытием и сдвигом относительно друг друга. В этом случае не требуется априорная информация о геометрии сцены съемки, расположении камеры и ее ориентации в пространстве, все данные становятся доступными из итеративного процесса сопоставления и корректировки серии большого количества пересекающихся изображений. Данный подход наилучшим образом реализуется применительно к серии снимков с высокой степенью взаимного перекрытия, позволяющего захватить трехмерную структуру сцены, видимую с разных позиций [Westoby et al., 2012] (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Схема съемки трехмерного объекта для дальнейшей фотограмметрической обработки по [Westoby et al., 2012]

**Figure 1.** Scheme of shooting a three-dimensional object for further photogrammetric processing from [Westoby et al., 2012]



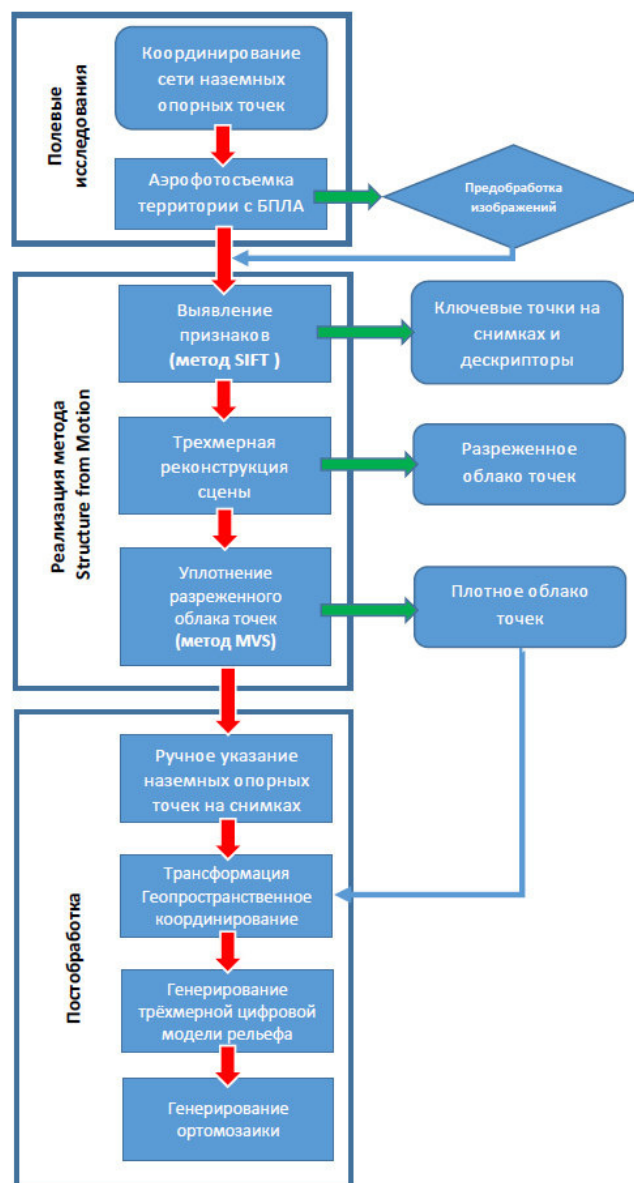
**Рисунок 2.** Пример поиска попарно соответствующих пикселей на изображениях с. Усть-Илья по методу SfM в Agisoft Photoscan (синим обозначены корректные связи, красным – некорректные, слева – 44 соответствия, справа – 2988 соответствий)

**Figure 2.** An example of a search for pairwise matching pixels in images of Ust-Ilya village according to the Structure from Motion method in Agisoft Photoscan (the blue color indicates correct connections, the red color indicates incorrect connections, there are 44 matches on the left side and 2988 matches on the right side)



Местоположение камеры и геометрия сцены реконструируется одновременно путем автоматической идентификации совпадающих элементов на множестве изображений (рисунок 2). Эти элементы отслеживаются от одного изображения к другому, что позволяет улучшать оценку местоположения камеры и координат объектов за счет итерационного процесса нелинейной минимизации наименьших квадратов, так как множество решений становится доступным после расширения базы данных снимков. Позиции камер, рассчитанные по методу SfM, не имеют ни масштаба, ни ориентации в пространстве, которые были бы получены по координатам наземных точек. В связи с этим трехмерное облако точек генерируется в некоторой относительной системе координат «пространства изображений», которая может быть привязана к реальной системе координат посредством явного указания реально существующих наземных точек. Эти наземные точки можно определить с помощью получения координат с устройств глобальных навигационных систем GNSS или выполнения других видов топографо-геодезических изысканий. В последнее время сочетание изображений, полученных с БПЛА и при реконструкции топографии с использованием алгоритма SfM, успешно применяется при исследовании разнообразных форм рельефа, трехмерных объектов зданий и сооружений. Оценка точности полученной модели обычно производится путем ее сравнения с другими методиками получения моделей местности высокого разрешения. При этом технологическая схема проведения работ включает в себя следующие этапы [Westoby et al., 2012] (рисунок 3):

1. Координирование сети наземных опорных точек и маркировка их местоположения любым способом, позволяющим определить их с фотоснимков, сделанных БПЛА.



**Рисунок 3.** Технологическая схема фотограмметрической обработки снимков БПЛА с использованием метода SfM

**Figure 3.** Technological scheme of photogrammetric processing of UAV images using the Structure from Motion method

2. Аэрофотосъемка исследуемой территории с использованием БПЛА. Фотоснимки, полученные с использованием БПЛА, имеют записанные в exif-теге географические координаты положения камеры в тот момент, когда они были выполнены.

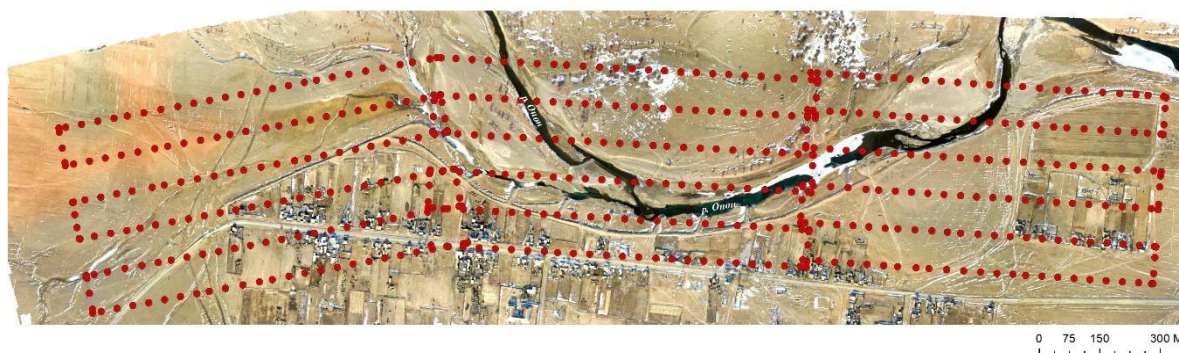
3. Реализация алгоритмов фотограмметрической обработки снимков по методу SfM с получением пространственно-ориентированного плотного облака точек местности.

4. Постобработка плотного облака точек с получением трехмерной модели местности и ортофотоплана высокого пространственного разрешения.

В рамках данных исследований была произведена оценка точности построения трехмерной модели защитных противопаводковых дамб в населенных пунктах Забайкальского края, полученной по данным БПЛА. Для анализа были выбраны защитные сооружения в с. Урейск, с. Усть-Илья и г. Шилка.

На подготовительном этапе полевых работ было произведено пространственное координирование участка с привязкой к существующим пунктам плановой и высотной геодезической сети. Топографо-геодезическая съемка выбранных объектов выполнялась с использованием GNSS комплекта Trimble R8s+R10 с постобработкой на Trimble Business Center. Привязка к местной системе координат МСК-75 производилась на пунктах Государственной геодезической сети 2 и 3

классов. Координирование участков, их перепроецирование в систему координат WGS 1984 с целью дальнейшей обработки и построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа высокого разрешения производилась в среде ArcGIS 10. Для получения аэрофотоснимков разрешением 4000×3000 пикселей использовался БПЛА DJI Phantom 3, оснащенный камерой Sony EXMOR FC300S. Камера имеет сенсор CCD с разрешением 12 мп и 20 мм широкоугольную линзу (35 мм эквивалент). Максимальный вес БПЛА составляет 1,5 кг. Полеты аппарата были запрограммированы с использованием программного обеспечения Pix4D Capture и Ctrl+DJI для обеспечения полного покрытия изучаемой местности на высоте 200 м, скоростью полета 6 м/с и автоматическим выполнением фотографий каждые 2 с. Запись координаты положения камеры в exif-тег производилась с использованием устройства GPS, установленного на борту беспилотного аппарата (рисунок 4).



**Рисунок 4.** Местоположение точек съемки фотокамеры, установленной на БПЛА (с. Усть-Илья)

**Figure 4.** The location of the shooting points of the camera mounted on the UAV (Ust-Ilya village)

Для генерирования цифровой модели рельефа и ортофотопланов из аэрофотоснимков, выполненных в надир, использовалось программное обеспечение Agisoft Photoscan<sup>1</sup>. На первом этапе фотоснимки выравнивались по алгоритму SfM [Ullman, 1979], который идентифицирует ключевые точки изображения и последовательно отслеживает их движение. Оценивание позиции камеры является одним из самых ответственных компонентов алгоритма

SfM [Szeliski, 2010]. Результатами выполнения первого этапа являются:

- 1) трехмерное облако точек, представляющее геометрию изучаемой области;
- 2) относительное местоположение камеры во время проведения съемки;
- 3) параметры внутренней калибровки (фокусное расстояние, коэффициенты дисторсии линзы).

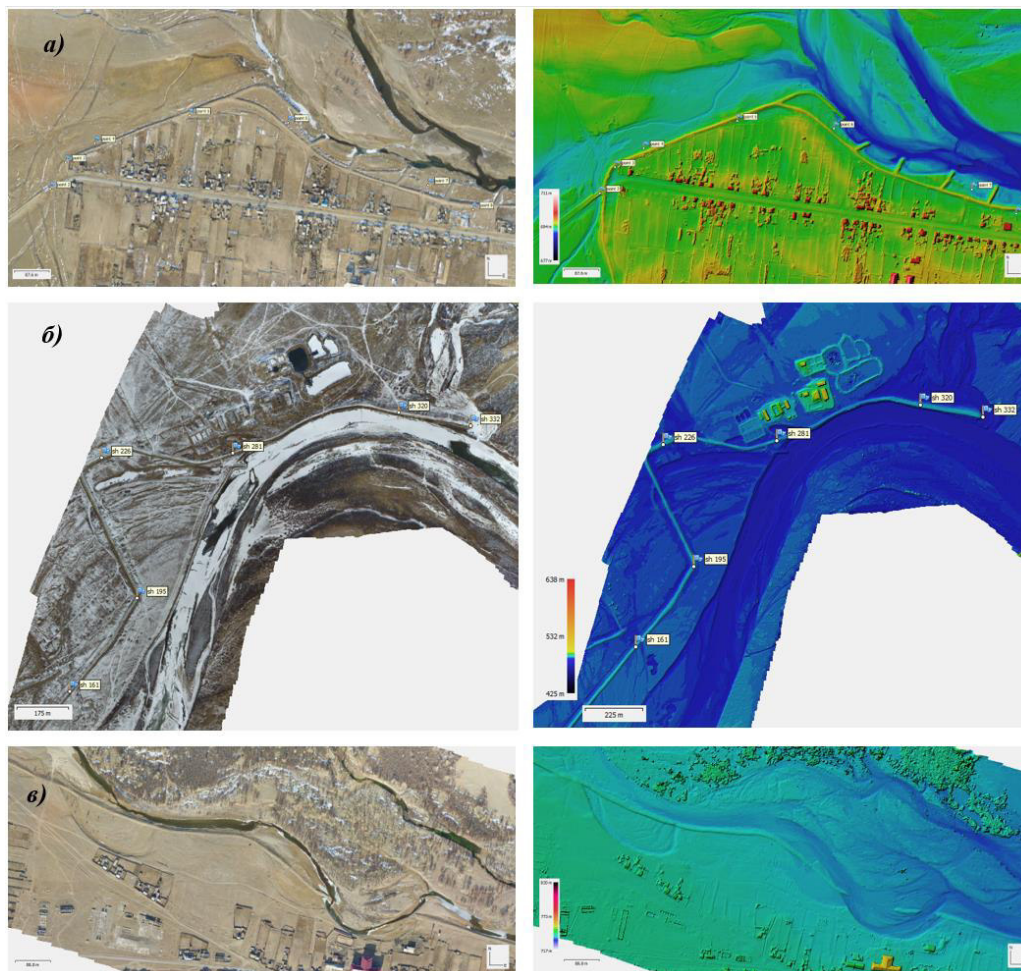
Второй этап подразумевает построение плотного облака точек. В зоне, прилегающей к воде большинство изображений, частично

<sup>1</sup> <http://www.agisoft.ru>



покрывают водную поверхность, которая должна быть исключена из топографии модели. Это производилось с помощью нанесения маски средствами Photoscan. На третьем этапе использовался алгоритм *multi-view stereo (MVS)* основанный на концепции компьютерного зрения, позволяющий произвести реконструкцию

трехмерной сцены по серии пересекающихся аэрофотоснимков [Westoby et al., 2012]. Далее полученная трехмерная модель местности подвергалась текстурированию и привязке к системе координат с целью получения ортофотоплана и цифровой модели рельефа (рисунок 5).



**Рисунок 5.** Фрагмент ортофотоплана и цифровой модели местности

а) с. Усть-Илья, б) г. Шилка, в) с. Урейск

**Figure 5.** Fragment of orthomosaic and digital terrain model

а) Ust-Ilya village, б) Shilka town, в) Ureysk village

### Результаты и обсуждение

Всего было осуществлено 4 запуска БПЛА в с. Усть-Илья, 5 – в с. Урейск и 7 в г. Шилка. Каждый из полетов БПЛА покрывал площадь 0,6 км<sup>2</sup> с получением около 130 фотоснимков при угле поворота камеры в 90 град. Размытые, а также не покрывающие изучаемую территорию фотоснимки удалялись из анализа, в результате фотограмметрической обработке подвергались 95–100 снимков. Время сбора серии снимков

составляло 12 минут с использованием одной батареи за один полет. На этапе построения разреженного облака точек проводилась проверка достаточности перекрытия снимков, пересекающихся на исследуемой территории. Участки, где наблюдалось одновременное наложение менее 4 снимков, считались недостоверными и в дальнейшем не рассматривались. Сведения о геометрических параметрах модели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры модели

Table 1. Geometric parameters of the model

Населенный пункт	Количество снимков	Разреженное облако точек, млн.	Плотное облако точек, млн.	Пространственное разрешение раstra ортофотоплана, м	Пространственное разрешение раstra цифровой модели рельефа, м
с. Урейск	646	0,28	152,2	0,079	0,161
г. Шилка	921	0,23	168,4	0,078	0,156
с. Усть-Иля	498	0,15	104,1	0,079	0,159

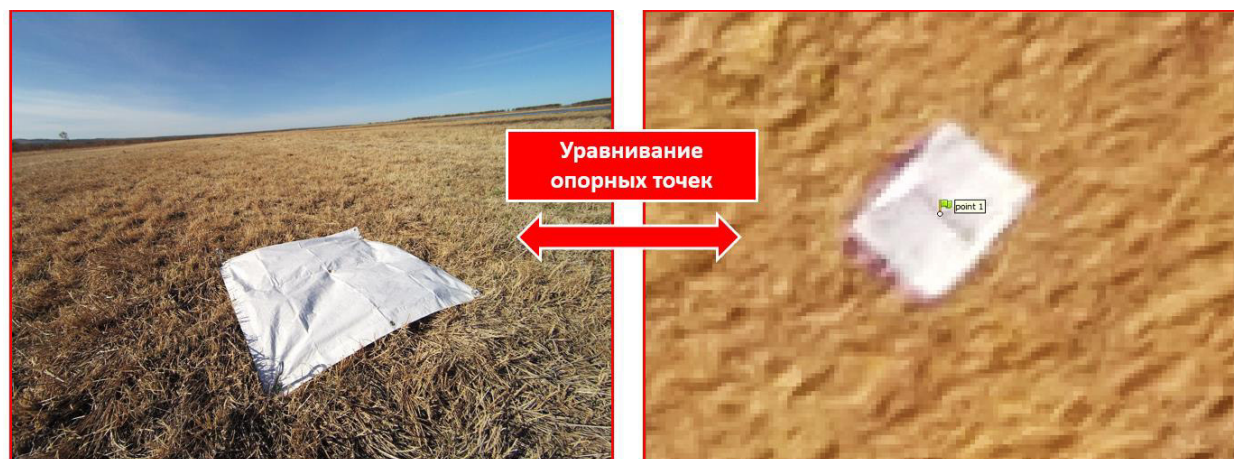


Рисунок 6. Наземные метки опорных точек (слева – вид с земли, справа – вид с высоты 200 м)

Figure 6. Ground marks of control points (left - view from the ground, right - view from a height of 200 m)

Для проверки достоверности полученной цифровой модели рельефа и истинных значений использовалась сеть наземных опорных точек, которые отмечались на твердых основаниях, не подвергавшихся изменению за время исследования. Опорные точки представляли собой белые квадраты размером 1x1 метр, закрепленные на поверхности земли металлическими кольями. Размеры квадрата на снимке составляли около 20x20 пикселей (рисунок 6).

В каждом населенном пункте было размещено по 10 квадратов, их точные координаты и высотные отметки использовались при построении цифровой модели местности путем явного указания на всех фотоснимках местонахождения точки привязки. Так как полученная трехмерная модель защитных противопаводковых дамб в каждом из населенных пунктов базировалась только на 10 точках привязки, необходимо было оценить

точность ее построения в других точках. Такая оценка выполнена путем сравнения двух вариантов – имеющиеся данные наземной съемки с использованием GNSS и данные, полученные в тех же точках, но по данным моделирования рельефа с БПЛА (рисунок 7). Первый вариант был использован как эталонный для сравнения и получения оценки эффективности второго варианта. Критерием являлась величина среднеквадратичной ошибки моделирования ( $m$ ), определенная по формуле (1):

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{i,м} - Z_{i,э})^2}{n}} \quad (1)$$

где  $Z_{i,м}$  – отметка поверхности в контрольной точке, определенная по результатам моделирования с использованием БПЛА;

$Z_{i,э}$  – отметка поверхности в контрольной точке, определенная по результатам наземных приборных измерений (эталонная);

$n$  – количество контрольных точек.





**Рисунок 7.** Ортофотоплан с. Усть-Илья с наземными опорными точками (выделены зеленым) и контрольными точками аэрофотосъемки с БПЛА (выделены красным), отрезками показаны кратчайшие расстояния от контрольных до опорных точек

**Figure 7.** Orthophoto map of Ust-Ilya village with ground control points (highlighted in green) and control points of aerial photography with UAVs (highlighted in red), the shortest distances from control to reference points are shown by segments

**Таблица 2.** Параметры оценивания точности модели

**Table 2.** Model accuracy assessment parameters

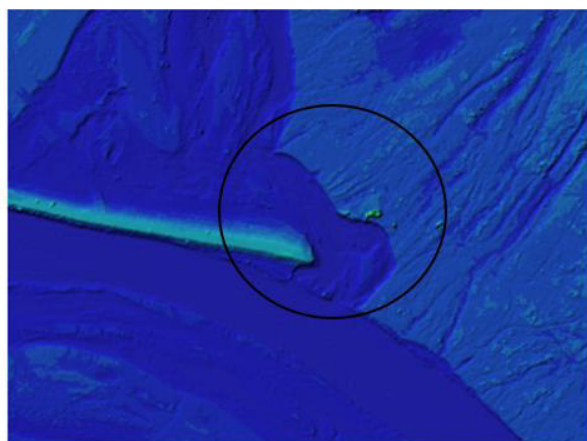
Населенный пункт	Длина дамбы, м	Опорных точек для привязки	Точек в контрольной выборке	Среднеквадратическая ошибка определения высотных отметок по модели (m), м	Коэффициент корреляции ошибки определения отметки и расстояния до опорной точки
с. Урейск	3403	10	108	0,104	0,05
г. Шилка	3834	10	103	0,091	0,02
с. Усть-Илья	2200	10	83	0,139	0,004

Очевидно, что величина среднеквадратичной ошибки по наблюдаемым пунктам, составляющая 0,09...0,14 м, не превышает пространственное разрешение цифровой модели рельефа, которое составляет около 0,16 м (таблица 2) и зависит от высоты съемки, разрешения съемочного аппарата и следующей за этим детальности модели.

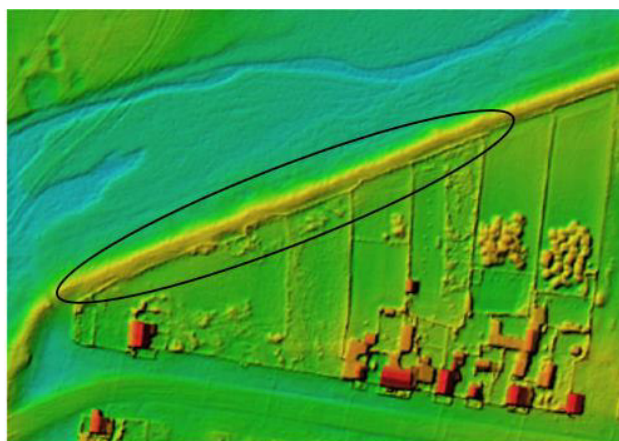
Также был произведен анализ возможных причин, влияющих на возникновение ошибки при моделировании рельефа. Была проверена гипотеза о влиянии удаленности опорной точки привязки модели от контрольных точек, по которым вычислялась ошибка. В случае наличия такой связи была бы отмечена высокая корреляция величины разности отметок и расстояния. Получить подтверждения этой

гипотезе не удалось, коэффициенты корреляции изменялись незначительно выше нуля (таблица 2).

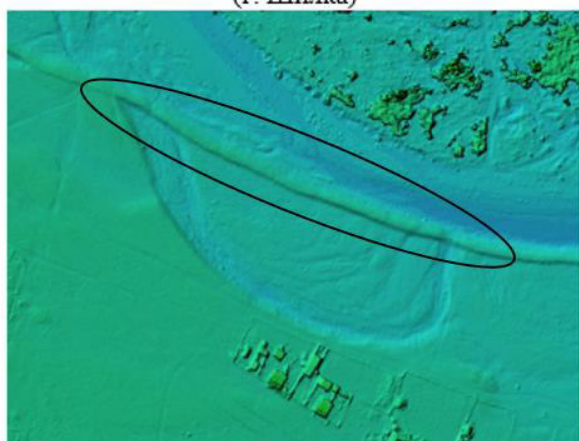
Исследование моделей защитных сооружений и прилегающей территории, выполненных с высокой детальностью, предоставляет возможность количественно оценивать объемные характеристики разрушений дамб и возможные последствия мероприятий по ремонту. При этом переход от традиционного к усовершенствованному обследованию на основании анализа компьютерных 3D-моделей объекта позволяет более качественно анализировать рельеф поймы и защищаемой территории, деформации русла, произошедшие за период эксплуатации линейных защитных сооружений.



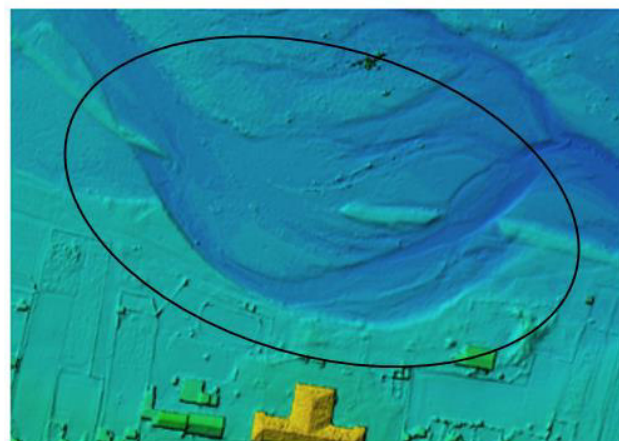
Дамба не достроена, резкий обрыв, отсутствие примыкания к высоким отметкам местности (г. Шилка)



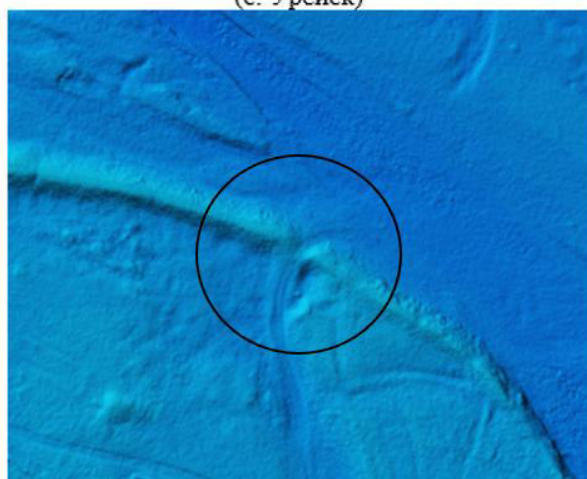
Откос дамбы застроен (с. Усть-Иля)



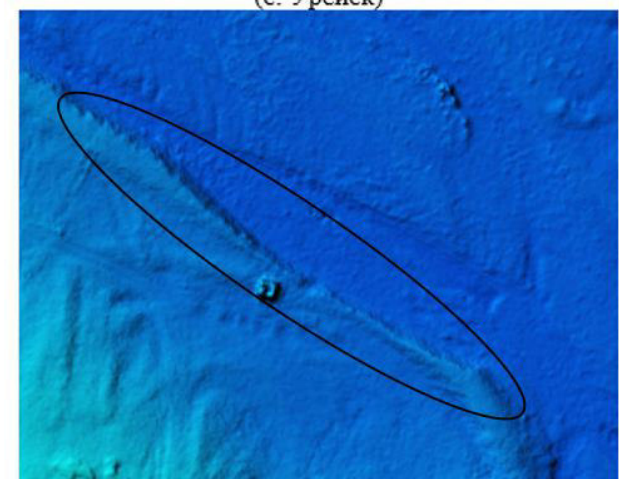
Пересыпанная старая протока реки Онон (с. Урейск)



Размыв тела дамбы спрямленного участка русла (с. Урейск)



Проран в дамбе для проезда автотранспорта



Подмыв и обрушение откоса дамбы

**Рисунок 8.** Обнаружение дефектов защитных сооружений на модели, полученной по данным съемки с БПЛА

**Figure 8.** Detection of defects in protective structures on a model obtained from UAV survey data

Пример обнаружения таких дефектов и их оценка на примере трех рассматриваемых сооружений представлены на рисунке 8.

Основными дефектами защитных противопаводковых сооружений являются непроектные съезды и проезды через гребень



дамбы с деформацией гребня, устройство в дамбе выемки для проезда автотранспорта и прогона животных, обрушение откосов. Для дальнейшего использования защитных сооружений рекомендуется проведение их капитального ремонта.

### Заключение

Использование БПЛА при изучении возможных дефектов в защитных противопаводковых сооружениях продемонстрировало возможность более

качественного оценивания их состояния. Для получения наилучшего результата в моделировании рекомендуется производить съемку с высоты не более 200 м и использовать координированные опорные точки, которые видно с воздуха для привязки модели к системе координат. В этом случае ошибка в определении отметок поверхности земли не будет превышать пространственного разрешения снимка. Местоположение опорных точек не оказывает существенного влияния на точность определения модели рельефа.

### Литература

Курганович К.А., Шаликовский А.В., Курганович Н.А., Голятина М.А. Опыт применения данных дистанционного зондирования Земли и беспилотных летательных аппаратов для решения водохозяйственных задач // Сборник материалов XIV Международного научно-практического симпозиума и выставки «Чистая вода России» (г. Екатеринбург, 18-20 апреля 2017 г.). Екатеринбург, 2017. С. 58-62.

Шаликовский А.В., Курганович К.А. Оценка опасности и риска хозяйственного использования речных пойм бассейна Верхнего и Среднего Амура // Вестник Читинского государственного университета. 2011. № 11 (78). С. 119-124.

James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2012. Vol. 117. Iss. F3. P. F03017. DOI: [10.1029/2011JF002289](https://doi.org/10.1029/2011JF002289)

Khaloo A., Lattanzi D., Jachimowicz A., Devaney C. Utilizing UAV and 3D computer vision for visual inspection of a large gravity dam // Frontiers in Built Environment. 2018. Vol. 4. Art. 31. DOI: [10.3389/fbuil.2018.00031](https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00031)

Ridolfi E., Buffi G., Venturi S., Manciola P. Accuracy analysis of a dam model from drone surveys // Sensors. 2017. Vol.17. Iss. 8. P. 1777. DOI: [10.3390/s17081777](https://doi.org/10.3390/s17081777)

### References

James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, vol. 117, iss. F3, p. F03017. DOI: [10.1029/2011JF002289](https://doi.org/10.1029/2011JF002289)

Khaloo A., Lattanzi D., Jachimowicz A., Devaney C. Utilizing UAV and 3D computer vision for visual inspection of a large gravity dam. *Frontiers in Built Environment*, 2018, vol. 4, art. 31. DOI: [10.3389/fbuil.2018.00031](https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00031)

Kurganovich K.A., Shalikovskiy A.V., Kurganovich N.A., Golyatina M.A. Opyt primeneniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli i bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya resheniya vodokhozyaistvennykh zadach [The practical experience of remote sensing and unmanned aerial vehicles using for water management tasks solution]. *Sbornik materialov Chetyrnadtsatogo Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma i vystavki "Chistaya voda Rossii" (g. Ekaterinburg, 18-20 aprelya 2017) [Proceedings of XIV International scientific-practical symposium and exhibition "Clean Water of Russia" (Ekaterinburg, April 18-20, 2017)]*, Ekaterinburg, 2017, pp. 58–62 (In Russian; abstract in English)

Ridolfi E., Buffi G., Venturi S., Manciola P. Accuracy analysis of a dam model from drone surveys. *Sensors*, 2017, vol. 17, iss. 8, p. 1777. DOI: [10.3390/s17081777](https://doi.org/10.3390/s17081777)

Shalikovskiy A., Kurganovich K. Flood hazard and risk assessment in Russia. *Natural Hazards*, 2017,



*Shalikovskiy A., Kurganovich K.* Flood hazard and risk assessment in Russia // *Natural Hazards*. 2017. Vol. 88. Iss. S1. Pp. 133-147.

*Szeliski R.* Computer vision: algorithms and applications. Available at: <http://szeliski.org/Book/>

*Ullman S.* The interpretation of structure from motion // *Proceedings of Royal Society London Biological Sciences*. 1979. Vol. 203. Iss. 1153. Pp. 405-426. DOI: [10.1098/rspb.1979.0006](https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0006)

*Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M.* 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // *Geomorphology*. 2012. Vol. 179. Pp. 300-314. DOI: [10.1016/j.geomorph.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021)

vol. 88, iss. S1, pp. 133-147. DOI: [10.1007/s11069-016-2681-6](https://doi.org/10.1007/s11069-016-2681-6)

*Shalikovskiy A.V., Kurganovich K.A.* Otsenka opasnosti i riska khozyaistvennogo ispol'zovaniya rechnykh poim basseina Verkhnego i Srednego Amura [Hazard and risk assessment for commercial use of the Upper and Middle Amur basin floodplains]. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta [Chita State University Journal]*, 2011, vol. 11 (78), pp. 119-124. (In Russian; abstract in English)

*Szeliski R.* *Computer vision: algorithms and applications*. Available at: <http://szeliski.org/Book/>

*Ullman S.* The interpretation of structure from motion. *Proceedings of Royal Society London Biological Sciences*, 1979, vol. 203, iss. 1153, pp. 405-426. DOI: [10.1098/rspb.1979.0006](https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0006)

*Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M.* 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012, vol. 179, pp. 300-314. DOI: [10.1016/j.geomorph.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021)